

## 磁化プラズマ中の電子波の放射と伝搬に関する研究

著者	大森 慎五
号	644
発行年	1977
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9380">http://hdl.handle.net/10097/9380</a>

氏 名	おおもり しんご 大 森 慎 五
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	磁化プラズマ中の電子波の放射と伝搬に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 安達 三郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 安達 三郎 東北大学教授 虫明 康人 東北大学教授 柴田 幸男 東北大学助教授 大沼 俊朗

## 論 文 内 容 要 旨

### 第一章 序 論

最近の飛躍的な宇宙開発の進歩に伴い宇宙探査が現実の問題として非常に重要な課題となっている。一方世界的にエネルギー危機が叫ばれる中でプラズマ核融合の実現が強く望まれているが閉じ込め，加熱の問題等が研究課題として残されている。いずれの場合も磁化プラズマ中の波動の研究は不可欠で電波工学の立場からもプラズマ物性工学の立場からも本研究の意義は大きい。

プラズマ中には電磁波に加え空間電荷の粗密を伴って伝搬する各種の静電波動が存在する。さらに磁化プラズマは異方性媒質であるため，これらの静電波の伝搬は等方性プラズマに比較し一層複雑となる。本論文では静電波動の中でも特に電子波に注目し磁化プラズマの本質的な異方性を説明することに主眼をおく。

プラズマ中の波動の解はマックスウェル方程式とプラズマ運動を記述する力学的方程式を組み

合せて得られるが本研究では電子波に注目しているため準静近似理論を用い、プラズマ記述の運動方程式として流体理論に加え現在のところ最もプラズマ運動を厳密に記述する運動論的理論までを含めて解析する。

磁化プラズマは異方性媒質であるため、プラズマ周波数  $f_p$ 、電子サイクロトロン周波数  $f_c$ 、上部ハイブリッド周波数  $f_u$  で区分される周波数領域により電子波の伝搬の様子が変化する。本論文では次の周波数領域をあつかう。

- (1)  $f_p < f < f_c$  電子プラズマモードが存在する。
- (2)  $f_p, f_c < f < f_u$  電子プラズマモードと静電々子サイクロトロンモードが存在する。
- (3)  $f_c < f < f_p$  電子プラズマモードは存在しないが静電々子サイクロトロンモードが存在する。

以上の周波数領域で電子波の斜め伝搬の基本的性質をすべて検討できる。

本研究は以上のように磁化プラズマ中の電子波の斜め伝搬に注目し運動論的理論まで含めて解析し、実験面では大容量かつ均質密度分布をもつ磁化プラズマを得ることに力点をおき、実験結果により理論解析の検討を行なうことが目的である。

## 第二章 流体理論による解析

プラズマ運動を巨視的にとらえ、密度勾配による熱運動効果を記述する流体理論による理論解析である。流体理論の基礎式より出発し、点波源により励起される電子波の波動電位の式を導いた。さらに電位はクーロンの静電々位と電子波々動位の和としてあらわされることがわかった。異方性媒質中では位相速度と群速度の方向が異なっている事実は良く知られているが、電子波の場合についてこの関係を定量的に検討した。点波源を中心として径方向での位相速度はRay速度であることがわかり、等位相面の計算を行なうことができた。この章は本研究の根幹をなしている。

## 第三章 運動論的理論による解析

運動論的理論はKinetic理論とも言われ現在のところプラズマ運動を最も厳密に記述する理論である。この理論によればプラズマ振動が通常の粒子間の衝突には依らない減衰が存在する。いわゆるランダウ減衰である。この章では任意の強さの磁場を含んだ運動論的理論により電子波の放射と伝搬について検討する。運動論的理論では流体理論では扱えない高次の波動モードまで含む。本論文ではその様なモードの一つとして静電々子サイクロトロンモードについて検討する。

流体理論の場合と同様、まず運動論的理論の基礎式より出発し点波源励起による波動電位の基礎式を導く。電子プラズマモードに加え、静電々子サイクロトロンモードについても位相速度、

群速度，Ray 速度により伝搬の様子を明らかにする。波動電位指向性についても両モードとも運動論的理論により検討する。運動論的理論の解析的な取扱い是一般に困難であるが本章では可能なかぎり解析的手法を用いる。静電々子サイクロトロンモードの波動電位も従来上部ハイブリッド周波数付近に限られ，かつ数値積分による結果だったものをすべての周波数で，かつ解析的な形で導くことができた。

## 第四章 流体理論と運動論的理論の比較

第二章では流体理論による解析，第三章では運動論的理論による解析を行なった。本章では流体理論と運動論的理論とによる比較ができる電子プラズマモードについてその伝搬および波動電位について検討している。流体理論では波数は実数で波動は減衰を伴わないが運動論的理論では波数は複素数となり減衰項を含み，かつ磁場となす角に大きく依存するため放射と伝搬の様子はだいぶ異なる。運動論的理論による方が伝搬角が狭くなり波動は転移角に達する前に減衰し伝搬しなくなる。Ray 速度については磁場方向の狭い角度領域では両理論とも大きな差は無いことがわかった。

流体理論では電子サイクロトロン周波数を境に波数の角度依存性が全く異なるが運動論的理論ではほとんど変化しなく，伝搬の様子は変化しないことがわかった。

## 第五章 大きさをもつ波源による電子波の放射電位

第二章，第三章，第四章での解析および検討はすべて点波源による電子波の励起を考え，その放射と伝搬を検討した。この理由は点波源による解がいわば基本解とも言うべきグリーン関数とみなせるからである。任意の形状の波源による解は点波源による解をその形状について積分すれば求まる。この章では第二章，第三章で得た点波源による放射電位の基本式をもとに大きさをもつ波源として円板状波源と無限大平面状波源による電子波放射電位について検討する。すべて一様電荷密度分布を仮定している。

円板状波源の場合には点波源による電位指向性にある電位指向係数を乗じた値になることがわかった。等方性プラズマの場合には数多くの研究があるが異方性プラズマの場合における電位指向係数を求めた例はないと思われる。

無限大平面状波源の場合には波数ベクトルを唯一の方向に与えることが可能であり，磁場に対し任意方向へ平面波の励起が行なえることがわかった。

## 第六章 実験及び実験結果の考察

磁化プラズマを実験室で得るには生成したプラズマに静磁場を印加すればよいが，波動の実験

に一般によく用いられる直流放電型プラズマ等の場合、磁場を印加した場合密度分布が著しく不均一となり斜め伝搬の実験には不適当な場合が多い。斜め伝搬の実験には均一な密度分布をもつ容量の大きな磁化プラズマを得ることが必要で、この目的のため本研究では高周波放電法によりプラズマを生成した。実験は電子プラズマモードと静電々子サイクロトロンモードについて行ない波源として点波源と無限大平面状波源について行なった。

電子プラズマモード……点波源により励起し、磁場となす角  $\theta$  に対しての干渉波形を測定し、その波形より位相速度、等位相面、振幅を求め理論結果との比較検討を行なった。その結果、径方向で観測されるのは Ray 速度であることを確認し、Ray 速度については流体理論と運動論的理論の結果に大きな差がないことがわかった。電位指向性については流体理論よりも運動論的理論の結果の方がより実験事実を説明することがわかった。

静電々子サイクロトロンモード……電子プラズマモードと同様の測定を行なった。理論的検討は当然運動論的理論による。Ray 速度、等位相面とも実験と理論は良い一致をみた。電位指向性については静電々子サイクロトロンモードについてのみの指向性とクーロンの静電々位をも含めた電位指向性についても実験を行なった。両成分による空間的な電位干渉パターンが得られ、第三章で得た理論式により説明された。このモードについては点波源励起の他に無限大平面状波源による励起も行ない磁場に対し任意方向へ波数ベクトルを与えることができることを確認し、第五章で得た理論結果により実験事実を説明し得た。

電子プラズマモードと静電々子サイクロトロンモードが同時に存在する周波数領域でも実験を行ない磁場方向の狭い領域では電子プラズマモードの伝搬が支配的で、その他の角度領域では静電々子サイクロトロンモードの伝搬が支配的になることがわかった。等位相面は電子プラズマモードが磁場にはば垂直、静電々子サイクロトロンモードは磁場にはば平行となる。以上の実験事実は理論結果に一致することがわかった。

## 第七章 結 論

本研究は磁化プラズマ中の電子波、特に電子プラズマモードと静電々子サイクロトロンモードに注目し磁場に任意方向への放射と伝搬について理論的ならびに実験的検討を行なったものである。

任意の強さの磁場が印加された異方性プラズマ中での任意方向への電子波の放射と伝搬について理論的検討を加え、実験により磁化プラズマの異方性を確認した点が非常に重要な点である。

理論的解析は比較的解析が容易な流体理論より出発し、現在のところ最もプラズマ運動を正確に記述する運動論的理論まで含めて斜め伝搬の一般的検討を行なった。その結果磁化プラズマ中の電子波の放射と伝搬の様子が明らかになり流体理論と運動論的理論の比較検討を行うことがで

きた。

従来、波動の実験には熱陰極放電型プラズマを用いる場合が多く磁場を印加した場合大容量かつ均質な密度分布をもつ磁化プラズマが得にくく斜め伝搬の実験には不適當な場合が多かった。これが斜め伝搬の実験的研究が非常に少ない理由の一つである。本研究では高周波放電プラズマを用いることにより斜め伝搬の実験に要求される磁化プラズマをえた。

磁化プラズマ中の斜め伝搬に関する研究はまだ緒についたばかりで、理論、実験共に十分とは言えず一層の研究が望まれる。本研究の成果が少しなりとも寄与するところがあれば幸いである。

## 審 査 結 果 の 要 旨

スペースプラズマ中の波動の観測や実験室プラズマの加熱に関連して、磁化プラズマ中に局在する波源による波動の3次元的な放射と伝搬の性質を定量的に明らかにすることが重要である。

本論文は、プラズマ波動のうち静電電子波に注目して、一様無限磁化プラズマ中の波源からの放射と伝搬に関して理論的並びに実験的研究を行って得た成果を取りまとめたもので全文7章よりなる。

第1章は序論で、本研究の背景と意義について述べている。

第2章では、磁化プラズマ中の単極点波源によるプラズマ中の電位を流体理論によって求めている。その結果、電位は冷プラズマ理論で与えられるクーロン静電電位と、電子プラズマ波の放射波動電位の和として与えられること、波動電位を鞍部点法によって解析的に求めた表示式は、直接数値積分による結果と良く一致することを示している。次に、異方性媒質に特有な性質として、電子プラズマ波の位相速度面、群速度面、光線速度面の間の関係について数値計算例を示して明らかにしているが、これらは本論文の理論解析の基本となるものである。

第3章では、前章の問題を運動論的理論によって解析したもので、ランダウ減衰を伴う電子プラズマ波モードと、流体理論では現われない静電電子サイクロトロンモードの両者に対する放射電位を計算する実用的な表示式を与えており、その価値は大きい。

第4章では、電子プラズマ波モードに対して流体理論と運動論的理論による結果の比較検討を行っており、両者の分散特性の違いによって放射指向性にもかなりの重要な差異の生ずることが示されている。

第5章では、点波源に対する以上の解析結果を用いて、有限円板波源による球面波の放射、並びに無限大平板による平面波の励起特性を解析しており、異方性媒質中における波源の大きさが及ぼす影響について有用な知見を与えている。

第6章では、大容量均質磁化プラズマを生成するために高周波放電を利用した装置による実験について述べている。光線速度、等位相面および電位指向性の測定を行った結果は前述の理論、特に運動論的理論の結果を裏付けていることを示している。これらは貴重な成果である。

第7章は、結論である。

以上要するに本論文は、磁化プラズマ中の局在波源による静電電子波の放射と伝搬に関して理論と実験の両面からそれらの特性を明らかにしたもので、電気工学並びにプラズマ工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。